

Étude de l'entropie humide dans un contexte d'analyse et de prévision du temps

I - Introduction

Réalisée au sein du Laboratoire de Prévision de Météo-France, sous la supervision de Pascal Marquet et de Patrick Santurette, cette étude se propose d'explorer plus avant le comportement des nouveaux champs thermodynamiques que sont la *température potentielle entropique humide* (Marquet, 2011), notée θ_s , et le *tourbillon potentiel humide* associé, noté PV_s , (Marquet, 2014), du point de vue de la prévision météorologique opérationnelle.

II - Définitions

La quantité θ_s , appelée communément entropie humide, est conservée au cours de transformations réversibles et adiabatiques, y compris dans les zones non saturées et dans les zones nuageuses non précipitantes, ce qui n'est pas le cas de la température potentielle équivalente θ_e , ou de la température pseudo-adiabatique du thermomètre mouillé θ'_w , communément utilisées pour analyser les aspects humides des champs météorologiques des régions tempérées ou tropicales. Le comportement du tourbillon potentiel humide PV_s est similaire à celui du tourbillon potentiel d'Ertel, PV_θ (Ertel, 1942, Hoskins et al., 1985), au dessus de 600 hPa, ce qui permettrait de l'utiliser en lieu et place des champs utilisés actuellement pour l'analyse et la prévision des anomalies dynamiques au niveau de la tropopause. Dans les parties basses de la troposphère, alors que PV_θ prend des valeurs positives dans l'hémisphère nord (respectivement négatives dans l'hémisphère sud), PV_s prend des valeurs plus équilibrées. Elles sont pour partie négatives, comme pour le tourbillon potentiel équivalent, PV_e (Moore et Lambert, 1995), mais avec des valeurs négatives plus modérées que PV_e . Le champ PV_s pourrait donc permettre d'obtenir des compléments d'analyse pour les basses couches, au delà de ce que le permettent les champs utilisés actuellement.

L'objectif de l'étude de θ_s et de PV_s n'est pas de supplanter ou de discréditer l'utilisation de paramètres ayant déjà fait leurs preuves (comme θ'_w ou PV_θ), mais bien de mieux connaître le comportement de ces paramètres non utilisés jusqu'alors, afin de détecter d'éventuels signatures liées à l'humidité, permettant un suivi plus détaillé et une meilleure prévision de l'évolution de l'atmosphère. Il ne s'agit pas pour cette étude diagnostique d'énoncer des principes généraux, ou encore d'élaborer une nouvelle méthode de prévision à partir de ces nouvelles variables, mais simplement d'effectuer un pas supplémentaire dans l'investigation de ces nouveaux champs thermodynamiques en tentant d'en extraire les principaux signaux, d'essayer de les relier avec la situation générale et les autres paramètres, afin de constituer un réservoir d'expériences en vue d'une exploitation plus poussée. Pour cela, il convient de définir les modes de représentation les plus pertinents et de prospecter la plus grande diversité possi-

ble de situations météorologiques afin de constituer un premier panorama des éventuelles possibilités d'exploitation des paramètres étudiés. C'est précisément ce que se propose de réaliser cette étude.

III - Méthode d'investigation

La caractérisation des principaux traits du comportement des champs explorés est réalisée à partir de l'analyse de la plus grande diversité possible de situations météorologiques. Les situations météorologiques suivantes ont été étudiées :

- frontologie au-dessus de l'océan Atlantique ;
- frontologie aux abords du continent Européen ;
- convection profonde en conditions hivernales ;
- convection profonde en période estivale ;
- cyclones.

Les modèles utilisés pour les moyennes latitudes sont le modèle hydrostatique ARPEGE avec une grille de 0.5° de résolution pour la grande échelle et avec une grille de 0.1° pour la méso-échelle, ainsi que le modèle non hydrostatique AROME avec une grille de 0.025° pour l'échelle fine. Pour les études relatives aux latitudes équatoriales, le modèle hydrostatique à aire limitée ALADIN-Tropiques sur l'océan Indien est utilisé avec une grille de 0.25° de résolution.

IV - Comportement de θ_s et PV_s dans les zones de frontogénèse

En cartographie isobare, le champ θ_s n'apporte pas de signal très différent de celui de θ'_w , mis à part des gradients plus marqués. À condition de prendre soin d'élaborer des échelles de couleurs pertinentes pour la représentation de θ_s en cartographie isobare, celui-ci peut aisément remplacer θ'_w pour l'observation et le suivi des principales zones homogènes d'un point de vue thermodynamique ainsi que pour les fronts dont les structures sont mieux lissées et mieux dessinées par des gradients plus marqués.

Sur les coupes verticales, le champ θ_s :

- fournit un signal moins bruité ;
- homogénéise mieux les basses couches sur la verticale ;
- sépare plus nettement les masses d'air ;
- dessine des pentes frontales plus douces au dessus de la couche limite ;
- repère les zones de forte turbulence, en particulier dans le cas des fronts froids dédoublés

Ce dernier point est particulièrement nouveau et spécifique au champ θ_s . Le schéma conceptuel qui peut alors être élaboré est représenté sur la figure 1.

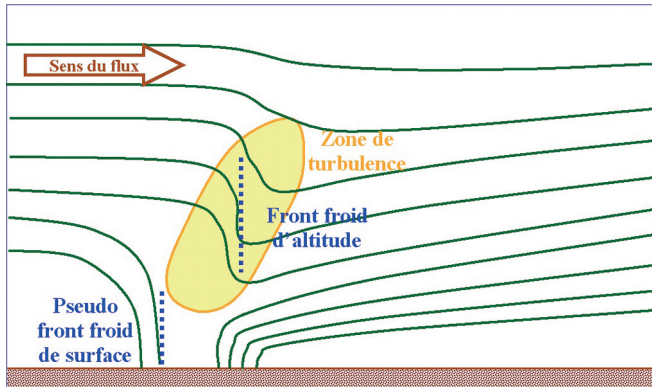


Figure 1 - Schéma conceptuel du front froid dédoublé en coupe verticale pour θ_s ; les isentropes humides sont en vert.

PV_s , pour sa part, délivre en cartographie isobare un signal équilibré positif/négatif, intermédiaire entre celui, positif, de PV_θ et celui, négatif, de PV_e . Les fronts froids sont bien identifiés par un PV_s nettement négatif, les fronts chauds semblent balisés par un PV_s positif, y compris les fronts chauds rétrogrades. L'instabilité des basses couches est identifiée par un PV_s faiblement négatif à moyenne et grande échelle, en particulier dans les zones de traîne. La figure 2 présente le schéma conceptuel qui émerge pour PV_s en cartographie isobare. On peut imaginer alors que PV_s soit utilisé pour la détection automatique des objets météorologiques qui servent à l'analyse et à la prévision du temps.

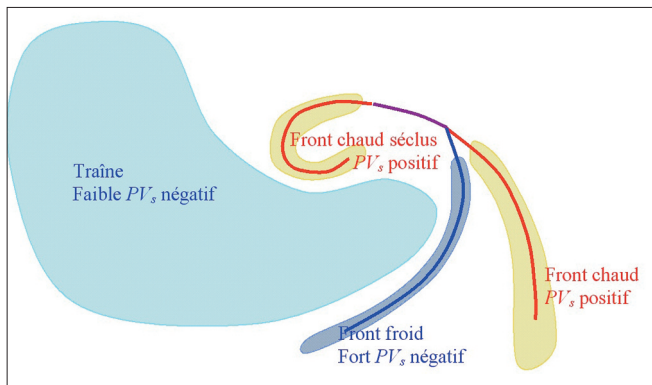


Figure 2 - Schéma conceptuel d'une cyclogénèse des moyennes latitudes dans l'hémisphère Nord d'après le modèle de Shapiro-Keyser (1993) (configuration en « T-bone ») ; front froid en trait bleu, fronts chauds en traits rouges, front occlus en trait violet. Les zones colorées correspondent à différents niveaux de PV_s : plus fortement négatif en bleu foncé (environ -2 PVUS), faiblement négatif en bleu clair (environ -1 PVUS), plus fortement positif en orange (environ +2 PVUS).

Un exemple pratique est fourni par l'examen des coupes verticales en θ'_w et en θ_s au travers d'une perturbation classique se développant sur l'Atlantique Nord le 8 janvier 2013 à 00 UTC, comme cela apparaît sur l'analyse synoptique donnée en figure 3.

Les coupes verticales en θ_s et en θ'_w sur la figure 4 permettent de constater que dans la partie haute de la troposphère, on retrouve la structure stable et homogène connue en θ'_w avec un gradient vertical positif et quasiment constant sur l'horizontale. Dans les basses couches,

on remarque que les structures proposées par θ_s sont plus lisses (moins bruitées), ce qui pourrait s'expliquer par le fait que θ_s intègre mieux les changements de phases de l'eau au cours des mouvements atmosphériques.

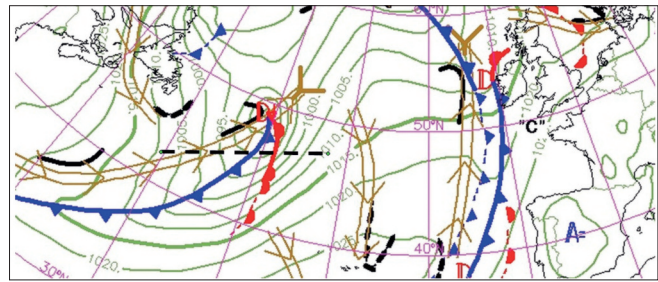


Figure 3 - ANASYG du 08 janvier 2013 à 00 UTC. Le trait en pointillés correspond à l'axe des coupes représentées sur la figure 4.

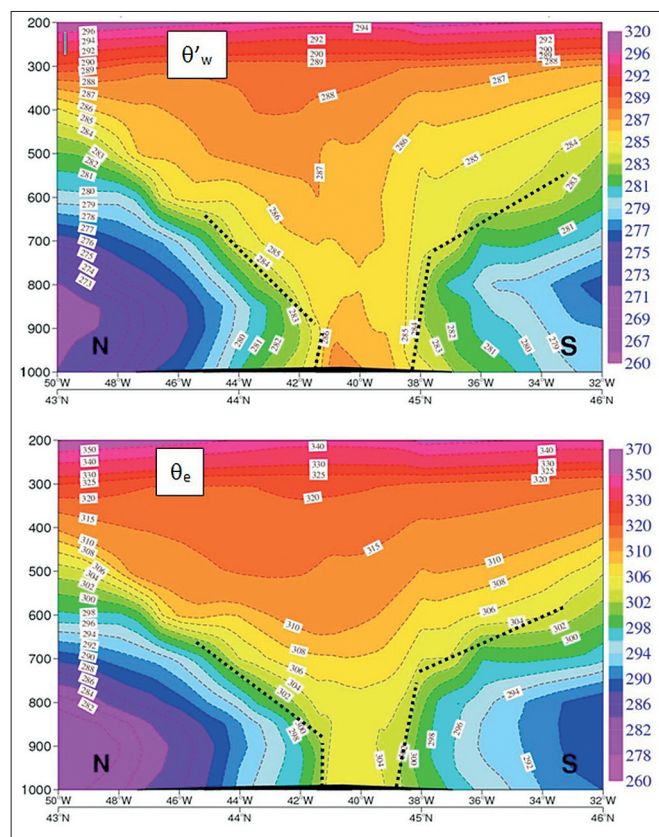


Figure 4 - Analyse du modèle ARPEGE-0.5 du 08 janvier 2013 à 00 UTC ; comparaison des champs de θ'_w (en haut en °C) et de θ_s (en bas en °C) en coupe verticale à travers une perturbation des moyennes latitudes au dessus de l'Atlantique Nord.

On voit que la coupe en θ_s fait apparaître des fronts plus homogènes et plus verticaux dans les basses couches que la coupe en θ'_w . En règle générale, le champ de θ_s s'homogénéise plus rapidement sur la verticale, lisse mieux les surfaces frontales à la limite entre les différentes masses d'air, et réduit de façon importante le gradient vertical des basses couches au sein du secteur chaud d'une perturbation. Ce secteur chaud apparaît d'autant plus facile à cerner. Le caractère plus vertical des isolignes de la θ_s dans les basses couches, est probablement la signature d'une meilleure prise en compte du mélange qui s'opère du fait

de la turbulence ; θ_s devient homogène sur la verticale, ce qui implique la présence d'isolignes verticales. Ce mélange est particulièrement intense dans les zones frontales. Le repérage des fronts et le suivi des masses d'air semblent facilités si l'on utilise θ_s . Les pentes frontales dans les basses couches étant plus verticales, la trace au sol des fronts semble plus facile à positionner.

V - Comportement de θ_s et PV_s dans les zones de convection profonde

A nouveau, θ_s et PV_s montrent des propriétés intéressantes dans le cadre des situations de convection profonde. En coupe verticale, θ_s permet de suivre clairement le lieu de la convection profonde grâce à une *aspiration partielle* vers le bas des isentropes humides de la haute troposphère. En outre, le suivi de l'évolution des basses couches est nettement facilité, suite au brassage convectif et à l'alimentation des couches proches de la surface en air froid par les courants de subsidence. Le schéma conceptuel de la ligne de grains est bien mis en évidence par θ_s , notamment grâce à cette meilleure représentation des poches froides et des courants de densité. Ce schéma conceptuel avec la vision en θ_s est proposé sur la figure 5. Bon traceur de l'instabilité des basses couches lorsqu'il est faiblement négatif à moyenne et grande échelle, PV_s affiché sur une carte isobare permet un repérage efficace des zones à potentiel convectif comme les zones de traîne relativement bien mélangées sur la verticale, ou encore des lieux où le chauffage diurne déstabilise la masse d'air par le bas. PV_s ne suffit cependant pas à caractériser l'instabilité sur toute la verticale, mais apparaît comme un bon candidat pour compléter les outils d'analyse et de prévision déjà existants

Le champ PV_s semble plus compliqué à analyser en coupe verticale avec le modèle AROME : les échelles explorées pour l'étude de la convection étant sans doute trop petites pour pouvoir tirer de réelles conclusions avec ce

modèle quant à l'utilité éventuelle d'un tel champ. En effet, PV_s étant calculé à partir du produit scalaire de deux vecteurs (un gradient et un rotationnel qui dépendent tous deux de dérivées spatiales), la résolution horizontale de la base de données et le nombre de niveau utilisés pour cette étude ne permettent pas d'envisager des résultats suffisamment précis à l'échelle de la cellule convective.

Néanmoins, l'analyse mise en œuvre ne semble pas tout à fait vaine, dans la mesure où des signaux semblent se répéter de façon plus ou moins fiable. On peut citer l'apparition d'un dipôle vertical positif/négatif dès lors que la convection profonde est suffisamment développée pour générer des subsidences significatives, ou bien encore la possibilité de détecter de l'instabilité dans les basses couches, instabilité bien représentée par un PV_s négatif à moyenne et grande échelle.

VI - Comportement de θ_s et PV_s dans les cyclones

Bien qu'elles paraissent peu évidentes en cartographie isobare dans les cyclones, les différences entre θ_s , θ'_w et θ_e sont beaucoup plus visibles en coupe verticale. Les isentropes humides (iso- θ_s) sont quasiment verticales dans les basses couches, ce qui indique la présence d'un processus de mélange turbulent des basses couches qui est mieux matérialisé avec θ_s qu'avec θ'_w ou θ_e . Les isentropes humides sont par ailleurs plus horizontales dans la partie supérieure de la troposphère, θ_s étant conservative aussi dans les zones nuageuses non-précipitantes à l'inverse de θ'_w et θ_e . Ces dernières semblent exagérer le refroidissement en milieu de troposphère. On assiste à une aspiration vers le bas des isentropes humides dans le cœur du cyclone, ce qui confère une structure stable au cœur sur toute la verticale. À l'instar de ce qui a déjà été constaté pour la convection profonde, l'aspiration de ces isentropes humides dans les zones de convection permet la mise en évidence des bandes spirales par des zones « en cornet ».

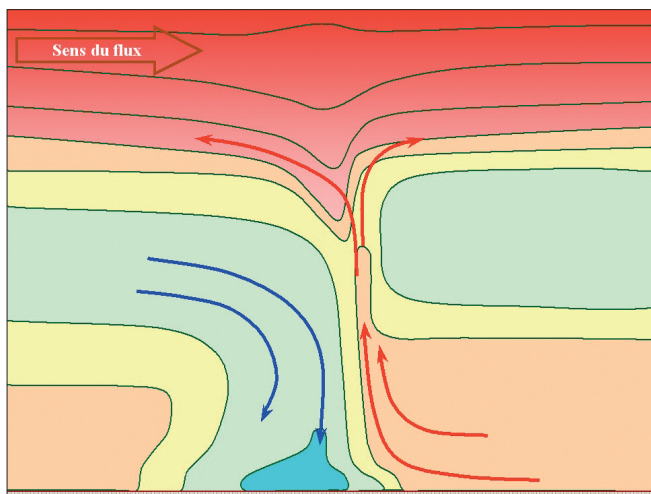


Figure 5 - Schéma conceptuel pour la convection profonde, coupe verticale en θ_s à travers une ligne de grains ; couleurs chaudes pour les θ_s élevées, couleurs froides pour les θ_s basses, isentropes humides en vert ; principaux flux : flèches rouges pour l'air chaud et humide, flèches bleues pour l'air froid et sec.

La figure 6 propose un schéma conceptuel de la vision en coupe et en θ_s d'un cyclone. Ce schéma, qui complète celui proposé par Beuscher (2010) inspiré des travaux d'Emanuel (1985), ne constitue qu'une première ébauche qui reste à perfectionner, notamment en termes de trajectoires. PV_s quant à lui est très négatif au centre (pour l'Hémisphère Sud). À l'extérieur du mur, PV_s prend généralement des valeurs faiblement négatives sauf à l'endroit des bandes spirales où apparaît un noyau positif. Ce faisant, PV_s paraît un bon intermédiaire entre PV_0 , globalement très négatif, et PV_e très positif. L'alternance négatif/positif de PV_s , lorsqu'on s'éloigne du centre, permet de suivre les bandes spirales. Ce repérage paraît optimal aux environs du niveau 700 hPa. L'effet de sillage du relief a un impact important sur PV_s . Même si ces perturbations sont moindres que celles constatées pour PV_0 ou PV_e , il convient d'être très vigilant vis-à-vis des contraintes imposées par l'orographie.

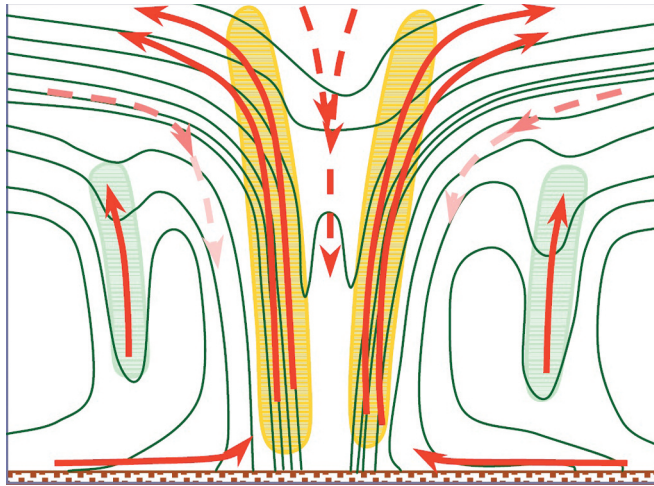


Figure 6 - Schéma conceptuel pour un cyclone, coupe verticale en θ_s à travers un cyclone ; isentropes humides en vert, mur de l'œil en zones orangées, bandes spirales en zones vert-clair, principales trajectoires matérialisées par les flèches rouges.

VII - Conclusion

Grâce à l'étude d'une variété la plus large possible de situations météorologiques, cette étude a permis d'améliorer la connaissance du comportement des nouvelles variables thermodynamiques que sont la température potentielle entropique humide θ_s , synonyme de l'entropie humide, et le tourbillon potentiel humide associé, PV_s . Réalisée au sein du Laboratoire de Prévision, l'analyse des principales caractéristiques du comportement de ces nouvelles variables a été menée du point de vue de la prévision opérationnelle du temps.

Au delà de la confirmation que θ_s permet d'accéder de façon relativement comparable à l'appréhension des principales structures météorologiques sur l'horizontale, il s'avère que θ_s délivre un signal plus lissé à petite échelle et que les gradients de θ_s sont un peu mieux marqués que ceux de θ'_w . Sur la verticale, θ_s est bien adaptée au suivi et à la détection des fronts, et offre, de plus, une nouvelle vision des fronts dédoublés où elle permet de mettre en évidence les zones de forte turbulence. La convection est, elle aussi, vue de façon nouvelle. Les zones de convection profonde provoquent une aspiration vers le bas des isentropes humides de la haute troposphère tandis que les poches froides et les courants de subsidence sont particulièrement bien repérés, ce qui a été mis en évidence par le suivi d'une ligne de grains. Enfin, la vision en θ_s des cyclo-

nes tropicaux permet d'envisager une interprétation renouvelée du cycle mis alors en place : la structure du cœur du cyclone est beaucoup plus homogène sur la verticale ; en haute troposphère, à l'extérieur de l'œil, les ascendances ne suivent plus les isentropes humides contrairement aux subsidences ; enfin les bandes spirales sont représentées par des zones « en cornet » permettant leur détection et leur suivi en moyenne troposphère, au dessus de la couche directement influencée par la surface.

En ce qui concerne PV_s , les conclusions sont moins évidentes du fait de la construction même du champ qui est issu du produit de deux vecteurs, un gradient et un vecteur tourbillon tous deux dépendants de dérivées spatiales. La résolution des données n'est peut-être pas suffisante sur la verticale pour estimer correctement ces dérivées. Cependant, PV_s apparaît comme un champ beaucoup plus équilibré que PV_θ ou PV_e . De plus, PV_s permet, sur l'horizontale, la détection des principaux objets météorologiques utilisés pour l'analyse et la prévision aux moyennes latitudes. Dans le cas des cyclones PV_s tant sur l'horizontale que sur la verticale, suscite un bon espoir de suivi des bandes spirales à des niveaux intermédiaires (entre 800 hPa et 400 hPa).

Même si beaucoup de travaux théoriques et pratiques restent à mener afin de conforter le bien-fondé de l'utilisation de la température potentielle entropique humide et du tourbillon potentiel humide associé pour l'analyse et la prévision opérationnelle du temps, cette étude a permis de confirmer l'intérêt que pouvaient susciter ces nouvelles variables thermodynamiques, dans la mesure où elles apportent une vision et des signaux différents et complémentaires de ceux mis à disposition actuellement. De plus, les nouvelles pistes suggérées permettent d'envisager un développement relativement large de leur utilisation, le projet le plus ambitieux étant le développement d'un outil d'inversion du tourbillon potentiel humide dans les basses couches, qui constituerait le pendant, en basses couches, du très puissant outil d'inversion du tourbillon potentiel d'Ertel déjà utilisé pour interagir sur la dynamique d'altitude.

ETIENNE BLOT *

*Ndlr : cette étude a été réalisée par Etienne Blot en juin 2013; Etienne est actuellement affecté au Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SHAPI), Pôle vigilance et prévision hydrométéorologique.

Bibliographie

- Beucher F., 2010. Manuel de *Météorologie tropicale : des alizés au cyclone*. N° 19 et N° 20 de la série Cours et Manuels - Météo-France ©
- Emanuel K. A., 1986. An air-sea interaction theory for tropical Cyclone. Part I: steady-state maintenance. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 585-604.
- Ertel, H., 1942. Ein neuer hydrodynamischer Wirbelsatz. *Meteorolog. Zeitschr.*, **59**, 277-281.
- Hoskins B. J., McIntyre M.E., Robertson A.W. 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **111**, 877-946.
- Marquet, P., 2011. Definition of a moist entropy potential temperature : application to FIRE-I data flights. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **137**, 768-791.
- Marquet, P., 2014. On the definition of a moist-air potential vorticity. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **140**, 917-929.
- Moore, J. T. and T.E. Lambert, 1993. The use of equivalent potential vorticity to diagnose regions of conditional symmetric instability. *Wea. Forecasting*, **8**, 301-308.
- Shapiro, M. A., and D. Keyser, 1990. Fronts, jet streams and the tropopause. *Extratropical Cyclones, The Erik Palmen Memorial Volume*, C. W. Newton and E. O. Holopainen, Eds., Amer. Meteor. Soc., 167-191.